

На правах рукописи



ВАХИДОВА КАРИНА ЛЕЧИЕВНА

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ
И ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ
ПОДШИПНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

**Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (технические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

ГРОЗНЫЙ – 2023

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация технологических процессов и производств» ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова».

Научный руководитель:

Минцаев Магомед Шавалович

доктор технических наук, профессор,
ректор ФГБОУ ВО «Грозненский
государственный нефтяной технический
университет имени академика М.Д.
Миллионщикова»

Официальные оппоненты:

Слесарев Юрий Николаевич

доктор технических наук,
доцент, профессор кафедры «Автоматизация
и управление» ФГБОУ ВО «Пензенский
государственный технологический
университет»

Волков Антон Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Информационная безопасность и сервис»
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н.П.
Огарёва»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Самарский государственный
технический университет»

Защита состоится «15» февраля 2024 г. в ____ часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.111.02 при ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова», ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)» по адресу: 364051, г. Грозный, пр-т Х. Исаева, 100.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д. Миллионщикова и на сайте университета: https://gstou.ru/science/dissertation_council/seekers/vakhidova.php

Автореферат разослан « » _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н.



Исаева Мадина Ризвановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Вихретоковый контроль широко используется для определения свойств качества токопроводящих поверхностей, в том числе и для оценки качества поверхностей качения деталей подшипников. Повышение точности и достоверности контроля позволяет повысить эксплуатационные характеристики подшипников, увеличить срок их службы, снизить уровень шума и вибраций.

Существующие системы амплитудного, фазового и амплитудно-фазового допускового вихретокового контроля поверхностей качения деталей подшипников в связи с неоднозначностью связи контролируемых выходных сигналов вихретокового преобразователя с конструктивно-технологическими параметрами шлифованной поверхности имеют высокий процент принятия ошибочных решений из-за возникновения ошибок контроля первого и второго рода.

Снижение процента ошибочных решений может достигаться применением современных интеллектуальных технологий контроля в том числе с использованием фрактального анализа и нейронных сетей.

Степень разработанности темы исследования. Теоретическими исследованиями вихретокового метода занимались многие исследователи и ученые среди них Ключев В.В., Сапожников А.Б., Федосенко Ю. К., а среди зарубежных ученых неоспоримый вклад по применению неразрушающего контроля (НК) внесли V. Dids, F. Ferster и ряд других. Эффективность исследования вихретокового метода и НК путем внедрения в производство рассматривались в работах Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина (СГТУ) Игнатьевым А.А., Игнатьевым С.А., Горбуновым В.В.

Метод определения и обработки сигналов по фрактальной размерности рассматривался в различных областях науки Б. Мандельбротом, С.В. Божокиным, Д.А. Паршининым, А.А. Потаповым и другими учеными.

Использование нейросетевых технологий в задачах контроля рассматривалось в работах ведущих ученых таких как Д.А. Поспелов, И.М. Макаров, В.М. Лохин, К.А. Пупков, Н. Д. Егупов, А.И., Галушкин, F. Uossermen F., S. Naykin, K.M. Hangos, S. Omatu.

Однако в этих работах не рассматривались вопросы, связанные с совершенствованием вихретокового контроля и диагностики дефектов поверхностей деталей подшипников с использованием фрактального анализа и нейронных сетей, не исследовались вопросы повышения диагностирования бракованных изделий.

Целью диссертации является разработка и внедрение методов и технологий для автоматизации вихретокового контроля и диагностики дефектов поверхностей качения деталей подшипников с использованием

фрактального анализа и нейронных сетей, с целью повышения точности достоверности и надежности этих процессов.

В соответствии с поставленной целью в работе решается ряд задач:

- разработка и внедрение новых методов и технологий для автоматизации вихретокового контроля и диагностики дефектов поверхностей качения деталей подшипников, что позволит повысить качество продукции и улучшить ее долговечность;
- исследование и анализ влияния различных факторов, таких как конфигурация объекта, разрешение и диапазон измерений, скорость сканирования и температурный режим устройства, на точность и достоверность получаемых данных;
- регистрация и адаптивная фильтрация экспериментальных данных системы вихретокового контроля и формирование обучающих выборок для проведения фрактального анализа, и обучения нейронных сетей;
- создание 3D-поверхностей деталей качения подшипников по сигналам вихретокового датчика;
- разработка методического обеспечения для автоматического распознавания локальных дефектов колец на основе фрактального анализа полученных 3D -поверхностей и вычисление их фрактальной размерности;
- формирование, обучение и практическое применение искусственной нейронной сети для диагностики дефектов на основе полученных данных, что позволит улучшить точность и быстродействие системы контроля;
- разработка системы автоматизированного контроля и распознавание локальных дефектов поверхностей деталей подшипников;
- разработка и тестирование программного обеспечения для автоматизации процесса вихретокового контроля и диагностики дефектов, что позволит упростить процесс и сделать его более эффективным;
- практическая реализация разработанной методики.

Объектом исследования являются системы вихретокового контроля дефектов поверхностей деталей подшипников

Предмет исследования: модели, методы, алгоритмы и технические средства автоматизированного вихретокового контроля дефектов поверхностей деталей подшипников, выполненные на основе фрактального анализа и нейросетевых технологий.

Методы исследования. Исследования проводились на базе автоматизации технологических процессов контроля в машиностроении, сингулярного спектрального анализа, фрактального анализа, нейросетевых технологий, математического моделирования, численных и экспериментальных методов с использованием автоматизированной системы вихретокового контроля деталей подшипников ПВК-К2М.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует следующим пунктам специальности ВАК 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки):

- пункту 2 «Автоматизация контроля и испытаний»

- пункту 6 «Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами»;
- пункту 15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы диагностирования (определения работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСТПП и др.».

Научная новизна результатов работы состоит в следующем:

1. Предложено осуществлять адаптивную фильтрацию экспериментальных данных с использованием сингулярного спектрального анализа, что позволило исключить влияние помех на достоверность контроля качества поверхностей деталей подшипников и сформировать валидированные обучающие выборки для проведения фрактального анализа и обучения нейронных сетей.

2. Разработан алгоритм формирования 3D-поверхностей деталей подшипников по сигналам вихретокового датчика, позволяющий оценить геометрию шлифованной поверхности и повысить достоверность вихретокового контроля.

3. Выполнен фрактальный анализ полученных 3D-поверхностей и определена фрактальная размерность поверхностей деталей подшипников с характерными дефектами, на основе которой осуществляется интегральная оценка качества поверхностей и достоверная диагностика дефектов.

Теоретическая значимость работы. В работе предложено и обосновано использование фрактального анализа для получения интегральной оценки качества поверхности подшипника для дальнейшего диагностирования дефектов.

Практическая значимость результатов исследования.

1. В результате устранения высокочастотных и низкочастотных помех за счет адаптивной фильтрации экспериментальных данных с использованием сингулярного спектрального анализа на 20 % повышена достоверность вихретокового контроля и уменьшено время контроля.

2. Повышена достоверность диагностики характерных поверхностных дефектов деталей подшипников с использованием интегральной оценки качества на основе определения фрактальных размерностей шлифованных поверхностей с последующей обработкой этих размерностей нейронной сетью.

3. Разработанная SCADA-система автоматизированного контроля и распознавания локальных дефектов поверхностей качения колец подшипников позволяет существенно повысить оперативность контроля и диагностики дефектов. Автоматическое обнаружение дефектов по сравнению с традиционным визуальным сокращает время их обнаружения.

На защиту выносятся следующие положения.

1. Алгоритм адаптивной фильтрации полученных информационных сигналов с вихретокового датчика, основанный на сингулярном спектральном анализе, устраняющий низкочастотные и высокочастотные помехи.

2. Алгоритм формирования 3D - поверхности деталей качения подшипников позволяющий по амплитудной и фазовой составляющим

сигналов вихретокового датчика оценить шлифованную поверхность, повысив тем самым достоверность вихретокового контроля.

3. Результаты фрактального анализа полученных 3D -поверхностей и определение значений их фрактальной размерности, позволившие получить интегральную оценку качества шлифованных поверхностей и повысить достоверность последующей диагностики дефектов.

4. Архитектура и процедура обучения радиальной базисной сети, обеспечивающая высокую достоверность диагностирования дефектов.

5. SCADA - система автоматизированного контроля и диагностирования локальных дефектов поверхностей колец подшипников, повышающая оперативность их контроля и диагностики.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждена путем математических доказательств, сходимостью теоретических и экспериментальных исследований, а также практическим внедрением разработанных алгоритмов и систем в производство.

Внедрение результатов работы. Алгоритм формирования 3D-поверхностей деталей качения подшипников по сигналам с вихретокового датчика, алгоритм диагностирования дефектов и специализированный программный модуль, выполненный в SCADA-системе внедрены в АО «ЕПК Саратов» г. Саратов, позволили повысить достоверность вихретокового контроля, тем самым снизить выпуск бракованной продукции.

Внедрение осуществлено в учебный процесс на кафедре «Автоматизация технологических процессов и производств» ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова».

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на конференциях различного уровня:

– международные научно-практические конференции «Фундаментальные и прикладные исследования проблемы и результаты» (Грозный, 2017 г); IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (Санкт-Петербург, 2017) ; Автотранспортный комплекс 3.0 Актуальные проблемы и перспективы развития (Грозный, 2023 г)

– всероссийские научно-технические конференции «Компьютерные технологии и телекоммуникации – 2016» (Грозный 2016 г); «Современные технологии в атомной энергетике» (Балаково, 2017г); «Миллионщиков 2018» (Грозный, 2018г); «Перспективы развития топливно-энергетического комплекса и современное состояние нефтегазового инженерного образования в России» (Грозный, 2018г); «Миллионщиков 2019» (Грозный, 2019г).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 21 работа, в том числе 2 работы в журнале, индексируемом SCOPUS, 5 работ в журналах, рекомендованных ВАК, 3 свидетельства о регистрации программ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка, включающего 151 наименований, и приложений. Текст изложен на 108 страницах, содержит 58 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

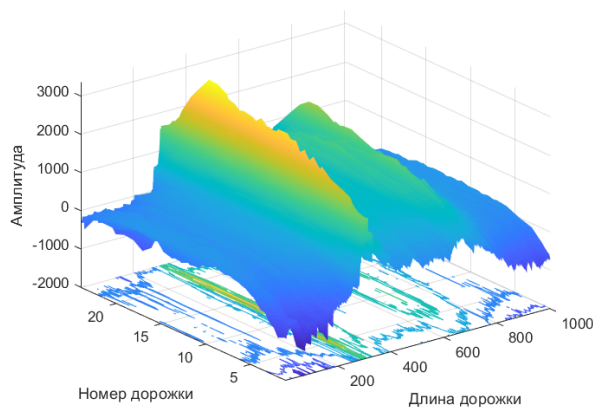
Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы основные цели и задачи, научная новизна, основные научные положения и результаты работы, выносимые на защиту, выделяется теоретическая и практическая значимость работы, характеризуется ее структура.

В первой главе произведен анализ факторов, влияющих на качество поверхностей деталей подшипников, приведена классификация дефектов, а также рассмотрены методы обработки сигналов вихретокового контроля.

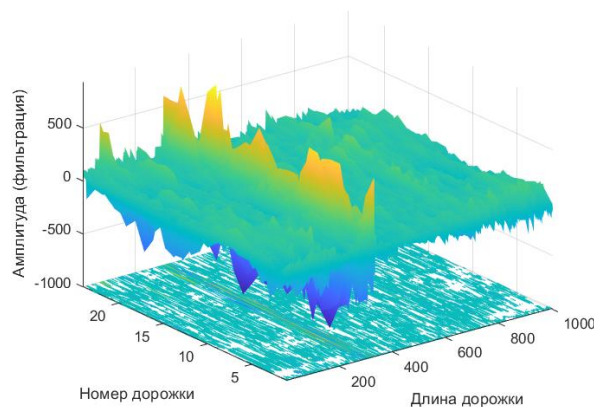
В результате научного исследования и анализа достоинств и недостатков различных методов распознавания был сделан вывод о возможности применения метода диагностирования бракованных изделий путем фрактального анализа информационных сигналов, полученный с помощью приборов вихретокового контроля, который ранее не рассматривался для шлифованного слоя поверхности подшипника.

Во второй главе рассмотрено математическое описание вихретокового контроля и диагностики дефектов поверхностей деталей подшипников, выявления неоднородностей при таком контроле. Для устранения помех, возникающих в процессе контроля, предложено использовать адаптивную фильтрацию сигналов вихретокового датчика, основанную на сингулярном спектральном анализе, позволяющем в результате SVD -разложения траекторной матрицы сканируемой поверхности выделять трендовые, регулярные и периодические составляющие с последующим их адаптивным устранением из исходного сигнала.

На рисунке 1 показано удаление трендовой и регулярной составляющих из траекторной матрицы, сформированной по сигналам вихретокового датчика.

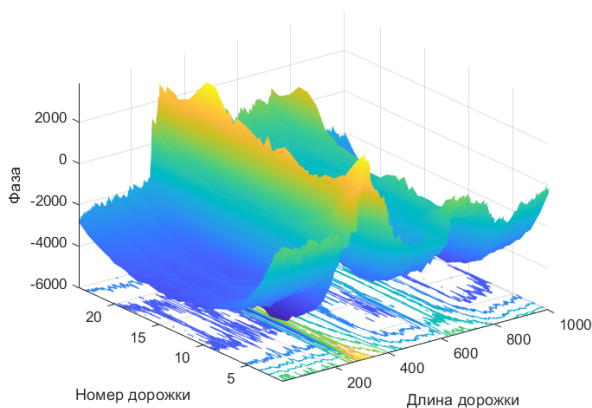


Исходная матрица
изменения амплитуды
сигнала

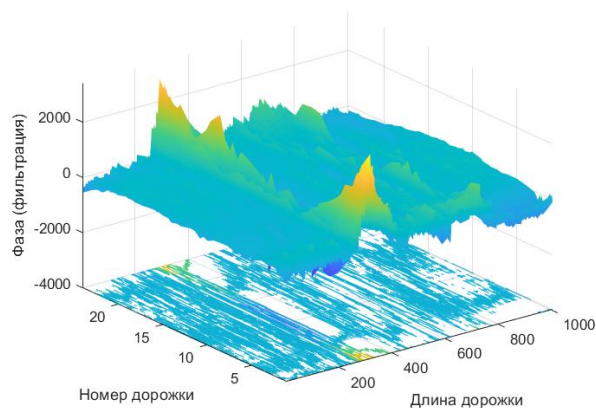


Матрица
изменения амплитуды
отфильтрованного сигнала

а)



Исходная матрица
изменения фазы сигнала



Матрица
изменения фазы
отфильтрованного сигнала

б)

Рисунок 1 – Фильтрация трендовой и регулярной составляющих из траекторной матрицы

Рассмотрены физические основы метода вихревых токов, подтвердившие возможность его использования для выявления и диагностирования различных типов дефектов, возникающих при производстве подшипников и обоснованно выбрать трехэлементную, электрическая схема замещения вихретоковых датчиков, которая приведена на рисунке 2.

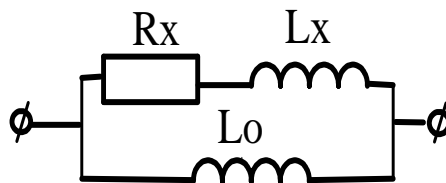


Рисунок 2 – Трехэлементная схема замещения вихретокового датчика.

На рисунке индуктивность L_x и сопротивление R_x это вносимые параметры схемы замещения, обусловленные взаимодействием магнитного поля датчика со сканируемой токопроводящей поверхностью, L_0 – индуктивность катушки датчика. Активное сопротивление катушки датчика R_0 включается последовательно со схемой замещения и на рисунке 2 не показано.

Для схемы замещения датчика (рисунок 2) передаточная функция его полной проводимости, АЧХ и ФЧХ запишутся в следующем виде

$$W(p) = \frac{(L_0 + L_x)p + R_x}{L_0 p (L_x p + R_x)}; \quad (1)$$

$$A(\omega) = \frac{1}{\omega L_0} \sqrt{\frac{R_x^2 + (L_0 + L_x)^2 \omega^2}{R_x^2 + L_x^2 \omega^2}}; \quad (2)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \left(\frac{R_x^2 + \omega^2 (L_0 + L_x) L_x}{\omega L_0 R_x} \right). \quad (3)$$

Выражения для АЧХ (2) и ФЧХ (3) позволяют, на заданной рабочей частоте Ω , по измеренным значениям $A(\Omega)$ и $\varphi(\Omega)$ вычислить неизвестные индуктивность L_x и активное сопротивление R_x .

$$I_x = \sqrt{I^2 + I_0^2 - 2II_0 \sin \varphi(\Omega)}$$

$$\sin \psi = \frac{I}{I_x} \sin(90^\circ - \varphi(\Omega)). \quad (4)$$

$$R_x = \frac{U}{I_x} \cos(\psi - 90);$$

$$L_x = \frac{U}{I_x} \sin(\psi - 90), \quad (5)$$

где $I = A(\Omega)$, $I_0 = \frac{1}{\Omega L_0}$ – ток холостого хода.

Проведённая аппроксимация зависимости индуктивного xL_x (на частоте 10 мГц) и активного сопротивления R_x датчика от зазора уравнениями экспоненты

$$R_x = R_n e^{-rs} + R_d$$

$$xL_x = xL_n e^{-ls} + xL_d \quad (6)$$

с максимальной абсолютной ошибкой аппроксимации, не превышающей 5 Ом, позволили вычислить искомый средний зазор между поверхностью датчика и сканируемой поверхностью.

На рисунке 3 представлен фрагмент изменения среднего зазора при сканировании одной дорожки шлифованной поверхности.

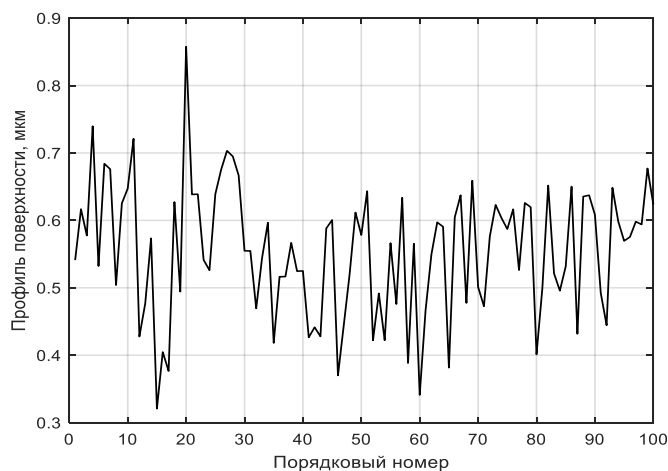


Рисунок 3 – Фрагмент рассчитанного профиля поверхности дорожки подшипника

Для расчета фрактальной размерности рассчитанного профиля поверхности был выбран метод Херста позволяющий выявить в статистических данных пакетного трафика такие его свойства, как кластерность, тенденцию следовать по направлению тренда, также к достоинствам метода можно отнести устойчивость оценки относительно формы распределения, в том числе несимметричных распределений и распределений с длинными хвостами.

Расчёт показателя Херста H проводился по следующей формуле:

$$H = \frac{\log(R/S)}{\log(aN)}, \quad (7)$$

где S – среднеквадратичное отклонение ряда наблюдений, R – размах накопленного отклонения Z_u , N – число периодов наблюдений, $a = \pi/2$.

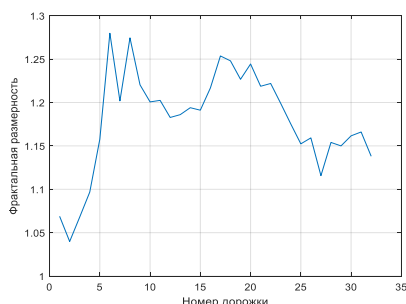


Рисунок 4 – Расчет фрактальной размерности дефекта «ментальная трещина»

Результат рассчитанной фрактальной размерности информационных сигналов дефекта «ментальная трещина» расположен на рисунке 4.

Завершающим этапом математического описания вихретокового контроля и диагностики дефектов поверхностей деталей подшипников является выбор структуры и процедуры обучения нейронной сети.

В ходе диссертационного исследования была выбрана радиальная базисная сеть, которая широко применяется в области аппроксимации функций, распознавания образов, обработки сигналов и идентификации системы благодаря, простой сетевой структуре и быстрой способности к обучению.

На рисунке 5 показана выбранная архитектура радиальной базисной сети.

Для формирования выходной обучающей выборки проводилось ранжирование дефектов по значению их фрактальной размерности и ранжированные номера дефектов использовались в качестве выходной обучающей выборки. Входная обучающая выборка формировалась из вычисленных фрактальных размерностей дефектов.

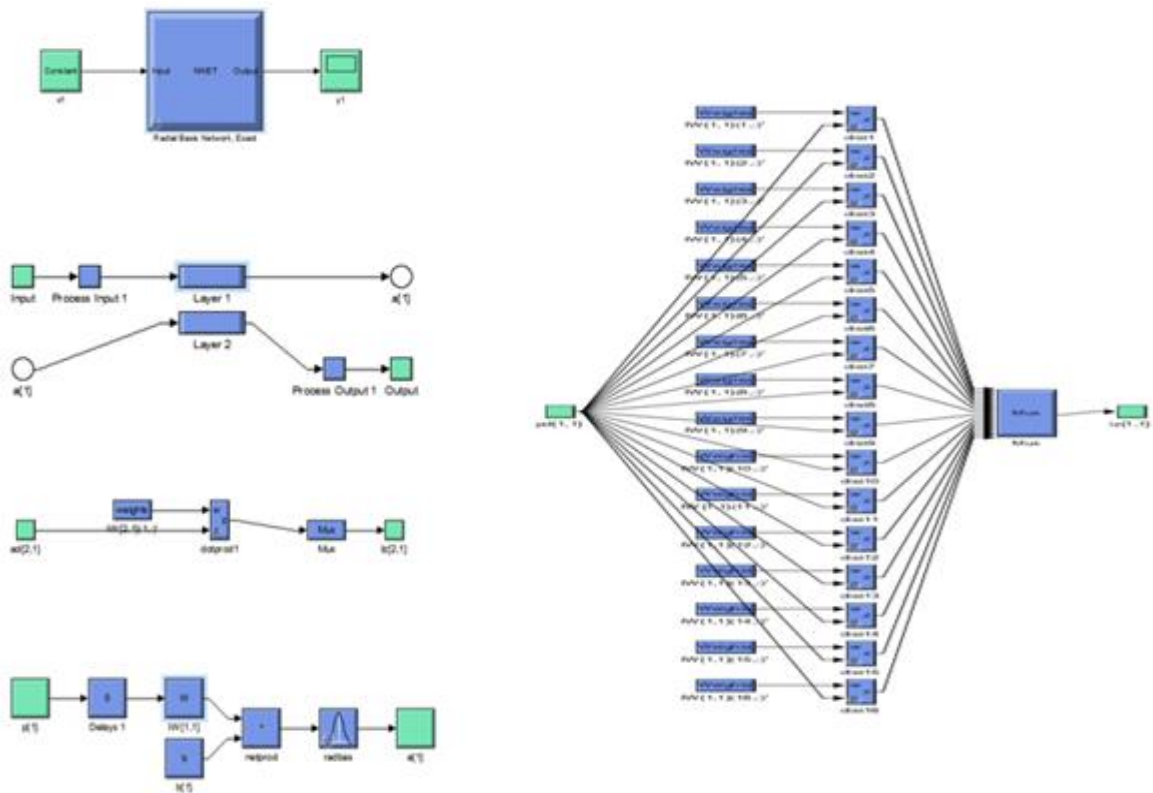


Рисунок 5 – Архитектура радиальной базисной нейронной сети.

Ошибка обучения для 16 рассматриваемых дефектов практически равна нулю и составляет значение порядка 10^{-12} .

Таким образом, доказана принципиальная возможность диагностики дефектов по фрактальной размерности с использованием интеллектуальных нейронных сетей.

В третьей главе выполнена алгоритмизация вихретокового контроля и диагностики дефектов поверхностей деталей подшипников.

Алгоритм формирования определения локальных дефектов по фрактальной размерности информационных сигналов с вихретокового датчика по дефектному профилю представлен на рисунке 6.

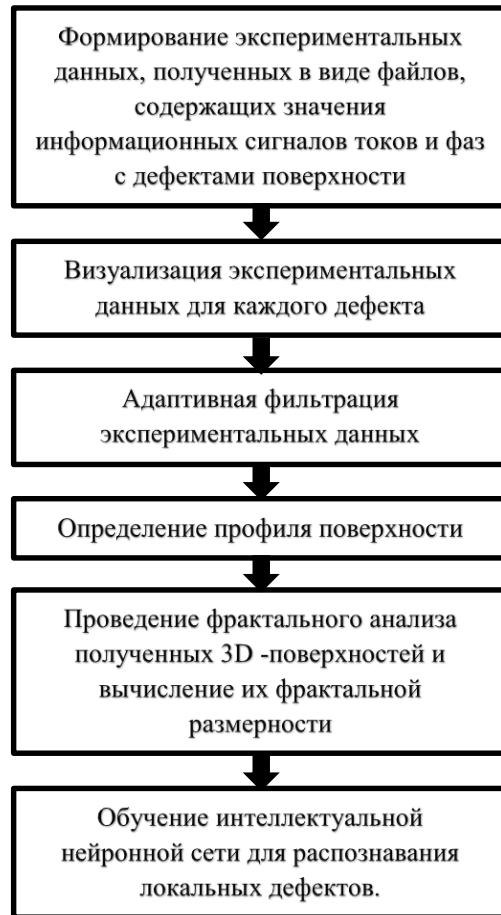


Рисунок 6 – Алгоритм определения локальных дефектов

Формирование экспериментальных данных и их визуализация отражены в приложении диссертационной работы.

Анализ осциллограмм и спектрограмм сигналов вихретокового датчика, представленных на рисунках 7 и 8 показывает, что сигналы амплитуды и фазы содержат мощную низкочастотную составляющую, не позволяющую выделять дефекты поверхности.

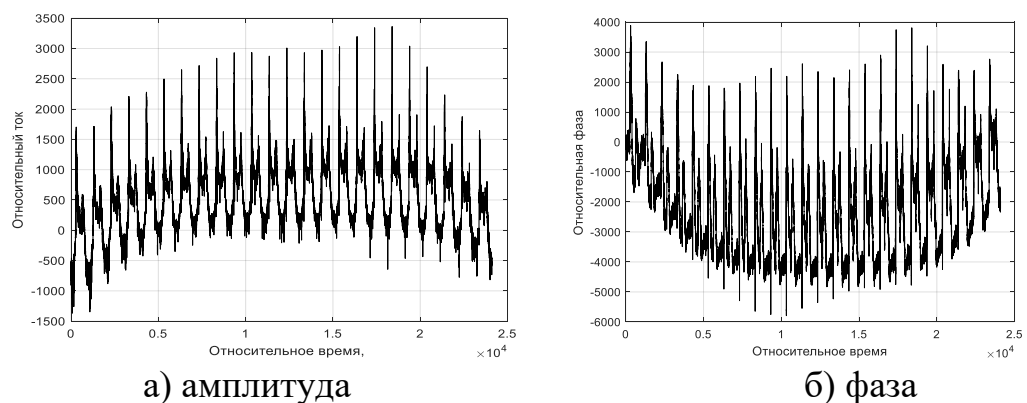
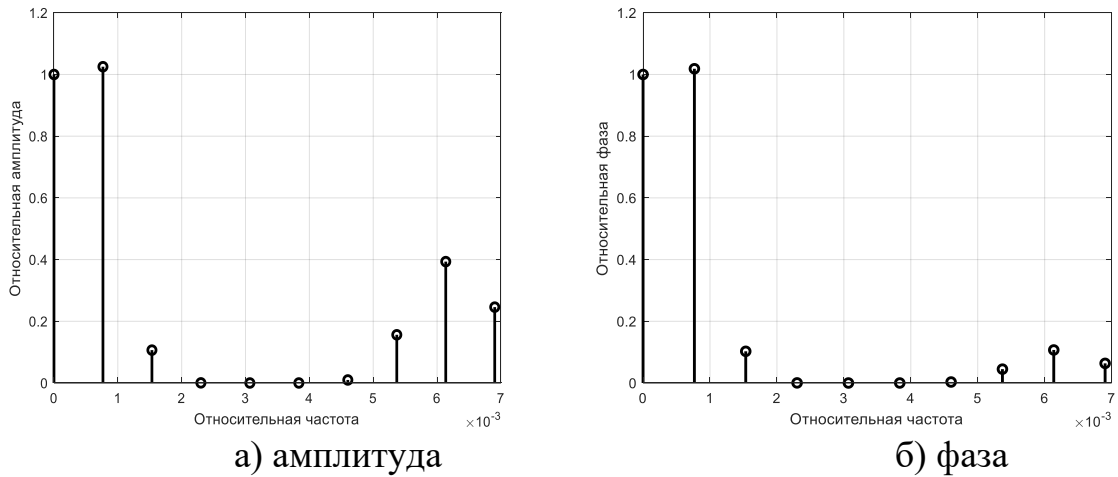


Рисунок 7 – Сигналы амплитуды и фазы на выходе вихретокового датчика (Шлифовальная трещина).



а) амплитуда
 б) фаза
 Рисунок 8 – Спектры амплитуды и фазы на выходе вихретокового датчика (Шлифовальная трещина).

Адаптивную фильтрацию предлагается осуществлять по методу главных компонент в соответствии с которым в соответствии с теоремой Эккарта — Янга необходимо приближать исходные траекторные матрицы матрицами меньшего ранга. Приближение осуществляется из условия

$$\lambda_i > \sigma(l), \quad (8)$$

где λ_i - собственные числа матрицы $\sigma(l)$ - среднее квадратичное отклонение собственных чисел этой же матрицы. Неравенство (7) имеет тенденцию занижать количество значимых главных компонент, как правило их число не превышает 4.

Введение адаптивной сингулярной фильтрации позволило полностью избавиться от низкочастотных помех повысив тем самым достоверность выявления дефектов (См. рис. 1).

Определение профиля поверхности осуществляется по результатам полученным в п.2 по следующему алгоритму:

1. Сканируется контролируемая поверхность и на рабочей частоте датчика регистрируются сигналы амплитуды и фазы на выходе вихретокового датчика А и ф.

2. По выражениям (4) и (5) вычисляются индуктивность L_x и активное сопротивление R_x катушки датчика.

3. По выражениям (6) вычисляется профиль поверхности.

Очевидно, что полученный профиль является результатом фильтрации истинного профиля вихретоковым датчиком методом скользящего среднего. Порядок фильтра определяется площадью активной поверхности датчика, взаимодействующей с исследуемым материалом.

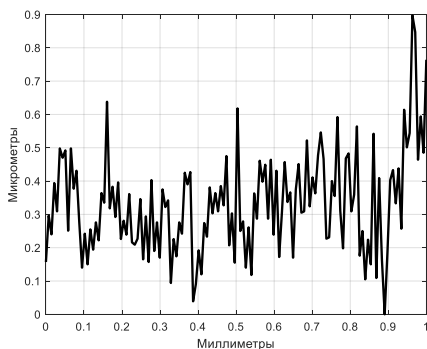


Рисунок 9 - Экспериментальная профилограмма дорожки

Для проверки уравнений (1-6) полученных в п.2 была экспериментально получена профилограмма дорожки качения внутреннего кольца подшипника, приведённая на рисунке 9.

По экспериментальным значениям профилограммы по формулам (1-6) был проведён проверочный расчет, показавший полное совпадение расчетной и экспериментальной профилограмм.

Расчет фрактальной размерности осуществлялся по следующему алгоритму:

1. Формируется временной ряд $X=[x_1, x_2, \dots, x_N]$ для которого рассчитывается фрактальная размерность.
2. Исходный ряд X разбивается на периоды различной длины.
3. Для каждого разбиения исходного ряда на периоды вычисляются оценки математического ожидания mX и среднеквадратичного отклонения sX .

4. Вычисляется накопленное отклонение ряда от его среднего значения

$$Z_u = \sum_{i=1}^N (x_i - mX). \quad (9)$$

5. Вычисляется размах накопленного отклонения

$$R = \max(Z_u) - \min(Z_u). \quad (10)$$

6. По формуле (7) вычисляется показатель Херста.

7. Рассчитывается фрактальная размерность D

$$D=2-H. \quad (11)$$

Расчет фрактальных размерностей для различных типов неисправностей приведён в приложении диссертации.

Полученные фрактальные размерности служат для формирования входной обучающей выборки радиальной базисной нейронной сети. Входная обучающая выборка формируется в следующей последовательности:

1. На траекторной матрице сканируемой поверхности выбирают дорожки, на которых фиксируется дефектная область.
2. Для выбранных дорожек рассчитываются фрактальные размерности.
3. Из совокупности полученных для каждого дефекта фрактальных размерностей формируется матрица входной обучающей выборки.

Для формирования выходной обучающей выборки дефекты ранжируются по среднему значению соответствующих им фрактальных размерностей (см. рисунок 10). Номера ранжируемых дефектов образуют выходную обучающую выборку.

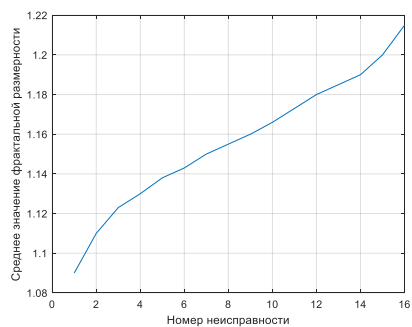


Рисунок 10 – Фрактальные размерности ранжируемых неисправностей

Анализ графика средних значений фрактальных размерностей позволяет сделать вывод о репрезентативности использования фрактальных размерностей для диагностирования дефектов шлифования дорожек подшипников.

Результат обучения радиальной базисной нейронной сети по сформированным обучающим выборкам показал практически

нулевую ошибку обучения для 16 рассматриваемых дефектов, составляющую значение порядка 10^{-12} .

Рассмотрены и обработаны созданным специализированным ПО все основные файлы массивов данных, соответствующие дефектам из классификатора КЗ-2005. Произведено 30 измерений с каждым из выбранных файлов. Диагностированы основные виды дефектов, достоверность распознавания обучающих выборок составила 100%.

В четвертой главе рассмотрены технические и программные средства системы вихретокового контроля, а также осуществлено практическое применение алгоритма диагностирования, выполненное в отечественной среде SCADA TRACE MODE, которая обладает значительными преимуществами:

- удобный операторский интерфейс;
- визуализация процесса в режиме реального времени;
- встроенная СУБД;
- создание качественных отчетов.

В результате проведенного исследования для подтверждения выбранной методики контроля была рассмотрена партия колец, отобраны 100 колец с известными дефектами. Распознаны 88% дефектов основных видов.

Реализация алгоритма диагностирования в SCADA TRACE MODE осуществляется в несколько этапов:

1. Получение данных в режиме реального времени с приборов контроля и занесение информации в базу данных, также данную операцию можно осуществить вручную для неавтоматизированных устройств.

2. Обработка сигналов с помощью программно-математического аппарата.

3. Диагностирование дефекта, определение его вида по классификатору.

4. Занесение информации в базу данных, которая позволяет сохранять данные о наличии и виде дефекта в течение короткого времени (10с), сохранять данные о результатах контроля порядка тысячи произведенных подшипников, оперативно анализировать накопленные данные, автоматизировать контроль качества деталей.

Полученная и обработанная информация поступает в лабораторию, отвечающую за координацию всех измерений в рамках предприятия, данные доступны в любой момент времени для персонала любой квалификации (руководителей предприятия, специалистов в цехах и отделах)

На рисунке 11 представлено окно запуска программы, выполненное в отечественной среде SCADA TRACE MODE.

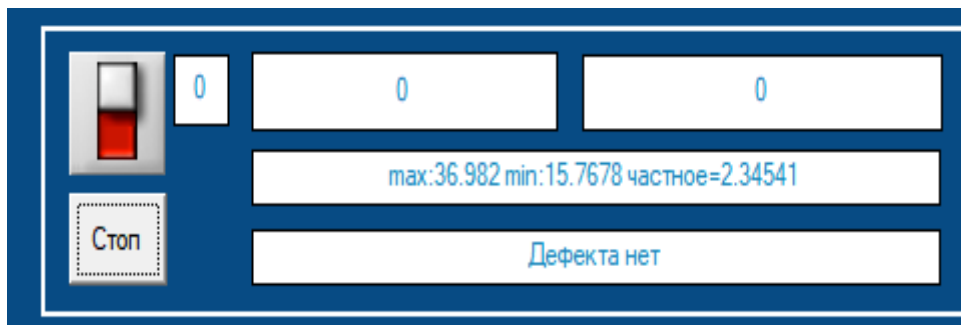


Рисунок 11 – Окно запуска программы по распознаванию дефектов

Полученная и обработанная информация с приборов контроля в режиме реального времени заносится в БД. Благодаря удобному интерфейсу и возможностям ПО можно создать качественные отчеты и диаграммы (рисунок 12), согласно выбранным запросам для дальнейших действий на предприятии (например, ремонтно-профилактические работы)



Рисунок 12 – График бракованных подшипников по дням за выбранный период

Полученные результаты доступны для специалистов, которые далее принимают решения по оценке оборудования, корректировках режимах работы. В итоге осуществляется приборный контроль на предприятии.

В результате можно сделать вывод, что данное практическое применение на предприятии:

- повышает качество выпускаемой продукции, путем диагностирования дефектов, а также выявлять причины их возникновения;
- снижает влияние человеческого фактора, уменьшает нагрузки на специалистов;
- формируется база данных бракованных изделий, что позволяет максимально исключить нештатные ситуации;
- проведение своевременных ремонтно-профилактических работ, что повышает стабильность работы предприятия;
- обучение персонала.

Алгоритмическое и программное обеспечение внедрено в АО «ЕПК Саратов» (г. Саратов), занимающегося разработкой приборов вихретокового контроля для подшипниковой промышленности.

В приложениях диссертационной работы представлены экспериментальные данные, листинги программ. Представлены копии актов о внедрении результатов научной работы, а также свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ методов неразрушающего контроля шлифованных деталей подшипников, установлена необходимость повышения достоверности выявления дефектов в поверхностном слое дорожек качения колец подшипников путем совершенствования вихретокового метода и совершенствования алгоритмов обработки информационных сигналов.

2. Проведена регистрация и адаптивная фильтрация экспериментальных данных системы вихретокового контроля и произведено формирование обучающих выборок для проведения фрактального анализа и обучения интеллектуальной нейронных сетей.

3. Созданы 3D -поверхности деталей качения подшипников по сигналам с вихретокового датчика, на основе которой осуществляется интегральная оценка качества поверхности.

4. Разработано методическое обеспечение и усовершенствовано алгоритмическое обеспечение для автоматического распознавания локальных дефектов на основе фрактального анализа полученных 3D -поверхностей и вычисление их фрактальной размерности шлифованных поверхностей с последующей обработкой этих размерностей нейронной сетью, что позволяет получить интегральную оценку качества поверхностей и существенно повысить достоверность диагностики дефектов.

5. Сформирована радиальная базисная сеть и проведено её обучение, позволившее обеспечить высокую достоверность диагностирования дефектов по фрактальному анализу.

6. Разработана система автоматизированного контроля локальных дефектов поверхностей качения колец подшипников в отечественной среде SCADA TRACE MODE с удобным интерфейсом, который позволяет осуществлять в режиме реального времени определение дефектов по фрактальной размерности информационных сигналов, что повышает

достоверность распознавания основных дефектов при производстве, приводящего к снижению брака на 20%.

7. Специализированный программный модуль внедрен в автоматическую вихретоковую систему в АО «ЕПК Саратов», занимающегося разработкой приборов вихретокового контроля для подшипниковой промышленности. Применение такой программы позволяет повысить качество контроля выпускаемых изделий.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

Публикации в журналах из Перечня ВАК Минобрнауки РФ

1. Значение комплексного управления качеством для предприятий машиностроительной отрасли / **Вахидова К.Л., Игнатьев С.А., Исаева М.Р., Хакимов З.Л., Шухин В.В.** // Инженерный вестник Дона, № 2. 2018. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4977. С. 91.

2. Распознавание дефектов поверхностного слоя подшипников с применением метода фрактальной размерности / **Вахидова К.Л., Игнатьев А.А., Исаева М.Р., Хакимов З.Л., Шухин В.В.** // Инженерный вестник Дона, №1. 2019 ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5664

3. Алгоритм определения износа резца при токарной обработке по запасу устойчивости динамической системы / **Вахидова К.Л., Минцаев М.Ш., Исаева М.Р., Игнатьев М.А., Игнатьев С.А.** // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 3. С. 56-63.

4. Алгоритм распознавания основных дефектов поверхностей колец подшипников с применением метода фрактальной размерности и нейронных сетей / **Вахидова К.Л., Минцаев М.Ш., Исаева М.Р., Пашаев В.В.** // Инженерный вестник Дона, № 3. 2022. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7499

5. Определение качества поверхностей качения колец подшипников по результатам вихретокового контроля / **К. Л. Вахидова, С. В. Абрамов, О. В. Ермилина, А. Д. Семенов** // Автоматизация в промышленности, № 8. 2022. С. 51-53.

Публикации в журналах из баз SCOPUS

6. **Vakhidova K. L., Khakimov Z.L., Isaeva M.R.** at al. Intelligent technologies in process of highly-precise products manufacturing // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 082052;

7. Application of the method of fractal dimension in the recognition of defects of the surface layer of bearings / **K. L. Vakhidova, Z. L. Khakimov, M. R. Isaeva, V. V. Shukhin, Z. V. Sadykova** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. 378 (1). 012076.

Свидетельства на программные продукты РФ

8. **Вахидова К.Л., Минцаев М.Ш., Игнатъев С.А., Казинский Н.А.** Программа диагностирования и принятие решений по качеству поверхности кольца подшипника Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017611861 14.12.20166

9. **Вахидова К.Л., Сперанский С.К., Родионов И.В., Сперанский К.С., Вахидова К.Л., Игнатъев А.А.** Программа для определения фрактальной размерности структурных дефектов после механической обработки Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018663135

10. **Вахидова К.Л., Семенов А.Д.** Программа расчета фрактальной размерности с использованием сингулярной фильтрации для оценки показателей качества шлифованных поверхностей Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021668885 22.11.2021

Публикации в других изданиях

11. **Вахидова К. Л., Игнатъев С.А.** Применение SCADA-системы в программе «Мониторинг» // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2016. С. 51-54.

12. **Вахидова К. Л., Шухин В.В.** Внедрение системы мониторинга качества продукции на предприятиях по производству подшипников // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2017. С. 145-147.

13. **Вахидова К. Л.** Экспертная система на основе SCADA Trace Mode, как составляющая системы мониторинга // Фундаментальные и прикладные исследования проблемы и результаты. Грозный, 2017. С. 128-131.

15. **Вахидова К. Л., Игнатъев А.А.** Вихретоковый контроль деталей подшипников в системе мониторинга технологического процесса // Автоматизация и управление в машино и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2018. С. 16-19.

16. **Вахидова К. Л., Игнатъев А.А., Игнатъев С.А.** Программа оценки и принятия решения по качеству поверхности кольца подшипника // Современные технологии в атомной энергетике: сб. тр. III Всероссийской научно-практической конференции. Балаково, 2017. Т. 2. С. 21-24.

17. **Вахидова К.Л.** Реализация программы диагностирования и принятие решения по качеству поверхности кольца подшипника SCADA Trace Mode // Перспективы развития топливно-энергетического комплекса и современное состояние нефтегазового инженерного образования в России: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Грозный: ГГНТУ, 2018. С. 303-307.

18. **Вахидова К. Л., Игнатъев А.А., Сперанский С.К., Игнатъев С.А.** Распознавание дефектов поверхностей качения колец подшипников по фрактальной размерности сигналов вихретокового датчика // Автоматизация и

управление в машино- и приборостроении.: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2019. С. 52-54.

19. **Вахидова К.Л.** Диагностирование основных дефектов возникающих на поверхности колец подшипников по фрактальной размерности // Миллионщиков-2019: материалы II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова. Грозный: ГГНТУ, 2019. С. 144-148.

20. **Вахидова К.Л.** Внедрение специализированного программного обеспечения для автоматизированного распознавания дефектов в АСУТП Яндаровские чтения: сборник научных материалов Всероссийского научно-практического семинара, посвященного 100-летию ГГНТУ. Грозный, 2020. С. 40-44.

21. **Вахидова К.Л., Садулаев А. А-В., Абдуллаев С.С.** Внедрение систем контроля для автоматизированного распознавания дефектов возникающих при производстве подшипников // Автотранспортный комплекс 3.0. Актуальные проблемы и перспективы развития: материалы международной научно-практической конференции. Грозный: ГГНТУ, 2023. С. 110-114.